

University of Groningen

Infrared properties of Dust in Interstellar Clouds.

Laureijs, René Johannes

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1989

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Laureijs, R. J. (1989). *Infrared properties of Dust in Interstellar Clouds*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Stof tussen de sterren

Lange tijd vroegen astronomen zich af of de ruimte tussen de sterren geheel doorzichtig was zodat het licht van verre objecten zonder verzwakking of verandering wordt waargenomen. J.C. Kapteyn, in zijn baanbrekend onderzoek aan het eind van de vorige eeuw naar de ruimtelijke verdeling van de sterren, ging ervan uit dat de interstellaire ruimte transparant is. Hij kwam tot de slotsom dat de sterren geconcentreerd zijn naar het vlak van de Melkweg met de Zon ongeveer in het middelpunt. Nu weten we dat dit resultaat niet geldig is. De Zon staat niet in het centrum, maar ver in de buitendelen van de Melkweg. Kapteyn kwam tot een beperkt inzicht doordat de ruimte tussen de sterren niet leeg is maar gevuld met wolken van gas en stof. Het kosmische stof in die wolken verduistert het licht van ver afgelegen en lichtzwakke sterren met als gevolg dat ze onzichtbaar worden.

In dit proefschrift probeer ik het stof in zulke wolken te beschrijven. Ik ben vooral geïnteresseerd in de aard van het stof. Ik onderzoek ook, terloops, de inwendige toestand van de interstellaire wolken. Hoe stellen we ons het kosmische stof voor? Het zijn minuscule deeltjes kleiner dan 0.5 micron¹, zo klein dat "interstellaire rook" feitelijk een betere benaming is. Net als rook zijn de deeltjes in staat licht te verduisteren. De studie van deze verduistering wordt door mij gebruikt om iets over de aard van het stof af te leiden.

Het stof kan zijn ware aard ook op een andere manier verraden. Verduistering ontstaat doordat het licht van de sterren opgenomen (geabsorbeerd) wordt. Op die manier vindt er een verwarming plaats: de stofdeeltjes gedragen zich dus als kleine zonne- (beter: sterre-) collectoren! Het sterlicht is echter zodanig zwak dat de grootste deeltjes relatief koud blijven. Hun

¹1 micron = 1 duizendste millimeter = 10^{-6} m

OVERZICHT

temperatuur is ongeveer 20 graden boven het absolute nulpunt van -273° Celsius. Deeltjes van zo'n temperatuur stralen toch nog zelf in de ijle koude ruimte tussen de sterren. De zogenaamde "golflengte" van dit licht is heel groot, rond de 100 micron². Zwak infrarood licht van het koude stof kan het best gemeten worden met gevoelige instrumenten boven de aardatmosfeer. Dat komt doordat op aarde en in de aardatmosfeer alles veel warmer is dan -253° C en daardoor ook sterk in het infrarood straalt. Zulke gevoelige instrumenten zaten aan boord van de InfraRood Astronomische Satelliet (IRAS). De hele telescoop waarmee de hemel bestudeerd werd, was gekoeld tot minder dan 10 graden boven het absolute nulpunt! Hoog boven de aarde, op ongeveer 900 kilometer heeft IRAS de straling van kosmische stofdeeltjes gemeten.

De succesvolle missie van IRAS heeft een prachtig beeld opgeleverd van de verdeling van het stof aan de hemel bij vier verschillende golflengten in het infrarood (12, 25, 60 en 100 micron). Dat kon echter alleen na zeer omvangrijke computerbewerkingen. De hemelkaarten laten zien dat het stof voornamelijk voorkomt in wolken. Deze worden overal aan de hemel gevonden maar zijn geconcentreerd naar het vlak van de Melkweg. Naast stof bevatten de wolken ongeveer honderd maal zoveel gewicht in waterstofgas, in de vorm van atomen (H) of als moleculen (H_2). De gelijkenis van deze wolken met bepaalde typen aardse wolken springt direct in het oog en daarom spreken astronomen nu ook over "infrarood cirrus", doelend op de uiterlijke overeenkomst met vederwolken. Interstellair wolken kunnen heel groot zijn; afmetingen van enkele tientallen lichtjaren³ zijn niet ongewoon. Voorts zijn de wolken in het algemeen zeer ijl. Ze hebben dichtheden van minder dan enkele honderden atomen per kubieke centimeter, hetgeen ijler is dan het beste vacuum dat men op aarde kan bereiken.

In dit werk heb ik naar wolken op hoge galactische breedte gekeken. Op een afstand van enkele honderden lichtjaren van de Zon staan deze wolken relatief dichtbij (in de "Melkweg-omgeving" van de Zon) en kunnen ze geïsoleerd waargenomen worden. Daardoor kunnen we structuren onderzoeken van minder dan 1 lichtjaar groot.

In hoofdstuk 4 wordt de wolk Lynds 1642⁴ in het sterrenbeeld Eridanus onderzocht. We analyseren een aantal waarnemingen van het stof in de wolk. Eén daarvan is de meting van licht afkomstig van de duizenden sterren in het vlak van de Melkweg, dat gereflecteerd wordt door de stofdeeltjes in de wolk. De meting is niet eenvoudig, aangezien het gereflecteerde licht erg zwak is, enkele honderden malen zwakker dan de helderheid van de zwakste planeet Pluto. Verder is met behulp van IRAS de wolk in het infrarood in kaart gebracht. Tenslotte hebben we door letterlijk sterren te tellen kunnen afleiden hoeveel licht er in totaal verstrooid en geabsorbeerd wordt door de wolk. De metingen in het verre infrarood bij 100 micron, gecombineerd met de stertellingen, geven ons een goed beeld van de hoeveelheid stof in de wolk langs een gezichtslijn. In figuur 1 is een schematische voorstelling gegeven van de manier van meten. Het blijkt dat een interstellair wolk eenzelfde eigenschap bezit als de wolken in onze eigen aardatmosfeer die we

²Zichtbaar licht heeft een golflengtebereik van 0.4 micron (blauw) tot 0.8 micron (rood).

³1 lichtjaar is de afstand die het licht aflegt in een periode van 1 jaar, hetgeen overeenkomt met 9000 miljard kilometer.

⁴De naam is ontleend aan de astronome B.T. Lynds die in 1962 een catalogus samenstelde van gebieden van verduisterd sterlicht. L1642 is de wolk met nummer 1642.



Figuur 1. Meting van de waarde gemeten in werkelijkheid

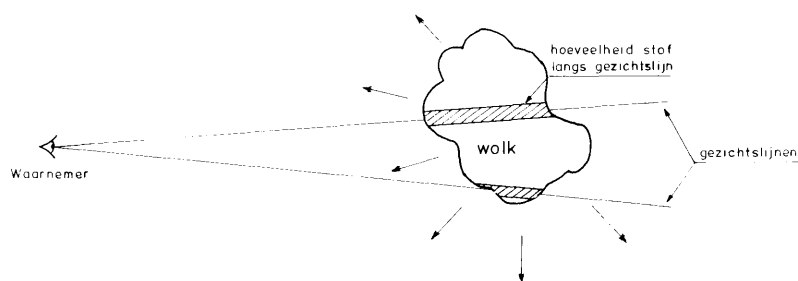
dagelijks in Nederland. Door te vergelijken wordt verstrooid wordt. ook absorberen.

Een ander int de wolken roder zi licht. Bekijken we melk, een blauw gemakkelijker vers wolken. We kunne een wolk niet verro noemen dit versch absorberen. Vervol tijd wordt deze eig

Met behulp v lengten in kaart gel dit werk. In hoofd buitendelen van d verantwoordelijke s We kunnen dit pro lang-golvige stralen licht al totaal geab een interstellair v naarmate we diepe voor blauw licht, ku volop aanwezig is. komt kunnen we na

Naast de 12 en

STOF TUSSEN DE STERREN



Figuur 1. Meting van de verdeling van de lichtintensiteit in een wolk. Bij iedere gezichtslijn wordt een waarde gemeten voor de intensiteit van het gereflecteerde licht en de hoeveelheid stof. De waarnemer staat in werkelijkheid veel verder weg dan weergegeven

dagelijks in Nederland kunnen waarnemen: aan de rand is de wolk helderder dan in het centrum. Door te vergelijken met een model zijn we in staat af te leiden hoe effectief het licht in de wolk verstrooid wordt. We vinden dat de deeltjes ongeveer de helft van het licht dat ze ontvangen ook absorberen.

Een ander interessant aspect van de wolken wordt toegelicht in hoofdstuk 5. Het blijkt dat de wolken roder zijn dan we zouden verwachten op grond van de eigenschappen van verstrooid licht. Bekijken we een glas melk dan zien we dat het licht, gereflecteerd door de deeltjes in de melk, een blauw schijnsel oplevert. Het blauwe schijnsel ontstaat omdat blauw licht gemakkelijker verstrooid wordt dan rood licht. Kennelijk is dit niet het geval bij interstellair wolken. We kunnen de waarnemingen alleen verklaren door aan te nemen dat het rode licht van een wolk niet veroorzaakt wordt door *reflectie*, maar door *emissie* van licht door stofdeeltjes. We noemen dit verschijnsel fluorescentie. Het ontstaat doordat de deeltjes ultra-violet licht kunnen absorberen. Vervolgens wordt dat licht weer uitgestraald in de vorm van rood licht. In de praktijk wordt deze eigenschap toegepast in TL-buizen.

Met behulp van de IRAS metingen zijn wolken bij de vier verschillende infrarood golflengten in kaart gebracht. Een voorbeeld van zo'n kaart kan worden gevonden op de omslag van dit werk. In hoofdstuk 4 wordt voor het eerst melding gemaakt van het feit dat alleen de buitendelen van de wolk bij 12 en 25 micron zichtbaar zijn. Dit effect ontstaat doordat de verantwoordelijke stofdeeltjes uitsluitend opgewarmd worden door violet en ultra-violet sterlicht. We kunnen dit proces vergelijken met het rood worden van de ondergaande Zon. Alleen de lang-golvige stralen (rood) kunnen nog door de aardse dampkring heendringen terwijl het blauwe licht al totaal geabsorbeerd of verstrooid is. Hetzelfde gebeurt in de ruimte. Indien we vanuit een interstellair wolk zouden kunnen waarnemen, dan zou de sterrenhemel roder worden naarmate we dieper in het binnenste van de wolk komen. De deeltjes die alleen gevoelig zijn voor blauw licht, kunnen alleen stralen in de buitendelen van de wolk waar het blauwe licht nog volop aanwezig is. Door nu precies te meten waar vandaan uit de wolk de infrarode straling komt kunnen we nauwkeurig schatten bij welke golflengten de deeltjes verhit worden.

Naast de 12 en 25 micron straling is ook in detail de 60 en 100 micron straling onderzocht

OVERZICHT

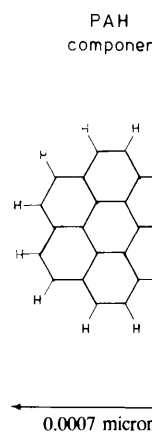
(hoofdstuk 6). Indien we de gegevens bij deze golflengten interpreteren op een manier die voordien gebruikelijk was in de infrarood astronomie dan blijkt dat de wolken in eerste instantie warmer lijken te worden naarmate we dieper in het inwendige van deze wolken gaan. Dit resultaat is zo verrassend omdat ik wolken gekozen heb die geen belangrijke inwendige warmtebronnen bezitten zoals pasgeboren sterren. Ik zou daarom het tegengestelde verwachten, namelijk dat de wolken juist kouder worden. De waarnemingen kunnen het beste begrepen worden indien de straling bij 60 micron veroorzaakt wordt door een ander soort stof dan bij 100 micron. Bovendien wordt in hoofdstuk 7 aangetoond dat de 12 en 25 micron straling totaal andere eigenschappen bezit dan de 60 micron straling.

De intensiteit van de straling bij 100 micron blijft toenemen evenredig met de hoeveelheid stof langs de gezichtslijn. Dit betekent dat binnendelen bijna even sterk moeten stralen bij 100 micron als de buitendelen van de wolken. Het verschijnsel ontstaat doordat het stof dat verantwoordelijk is voor de 100 micron straling, behalve in het blauwe ook sterk in het rode gedeelte van het spectrum absorbeert.

In hoofdstuk 7 wordt getracht een zo volledig mogelijke theorie van het kosmische stof te ontwikkelen. Die theorie hebben we in hoofdstuk 8 gebruikt om de infrarood eigenschappen van een bijna ronde wolk te interpreteren. We maken de veronderstelling dat kosmisch stof een verzamelnaam is voor een mengsel van verschillende soorten deeltjes, waarbij elk soort eigenschappen bezit die verschillende aspecten van onze waarnemingen kunnen verklaren. Uiteraard mag het nieuwe beeld niet in strijd zijn met reeds bestaande waarnemingen. De best sluitende verklaring wordt gevormd indien aangenomen wordt dat het stof minimaal uit vijf verschillende soorten deeltjes bestaat. We zullen deze soorten in het vervolg aanduiden als de "componenten" waaruit het kosmische stof is samengesteld. Drie van die componenten zijn schematisch weergegeven in figuur 2.

De eerste drie componenten voldoen aan de reeds vroeger bestaande waarnemingen. Deze worden de "klassieke" componenten genoemd. Eén van de klassieke componenten bestaat uit een kleine silicaat kern (zandkorrel) omgeven door een mantel van verbindingen van koolstof, stikstof, zuurstof en waterstof. Deze mantel van organisch materiaal kunnen we het beste vergelijken met roet in schoorstenen. Als nieuwe aanvulling op de reeds bestaande theorie veronderstellen we dat de mantel in staat is om sterk het rode licht te absorberen, waardoor de infrarood metingen bij 100 micron verklaard worden. De andere twee klassieke componenten bestaan uit deeltjes van zuiver silicaat resp. grafiet.

De vierde component is gepostuleerd om de infrarode straling bij 12 en 25 micron te verklaren. De deeltjes in deze component zijn zo klein dat ze in feite grote moleculen zijn. De moleculen blijken uitsluitend uit koolstof en waterstof te bestaan en bevatten gemiddeld 40 tot 50 koolstofatomen. De structuur van deze moleculen is heel speciaal en wordt in de chemie aangeduid als poly-aromatische koolwaterstoffen, afgekort tot "PAH's". Een voorbeeld van zo'n PAH is in figuur 2 weergegeven. Op aarde kunnen zulke moleculen gevonden worden in uitlaatgassen van auto's, in asfalt en in sommige uiterst giftige (afval-) producten van chemische industrieën. Een dergelijk molecuul is heel plat. Onder invloed van ultra-violet licht zal het molecuul gaan vibreren. Net als het vlies van een trommel kan het molecuul alleen op een beperkt aantal manieren trillen en derhalve alleen bij bepaalde golflengten infrarode straling uitzenden. De verbindingen tussen de koolstofatomen in een PAH bezitten de eigenschap om ultra-violette straling door middel van fluorescentie om te zetten in rood licht, precies zoals we dat waargenomen hebben in een van onze wolken beschreven in hoofdstuk 5.



Figuur 2. Drie co
platte moleculen
ronde deeltjes. I
componenten is h
dingen met koolst

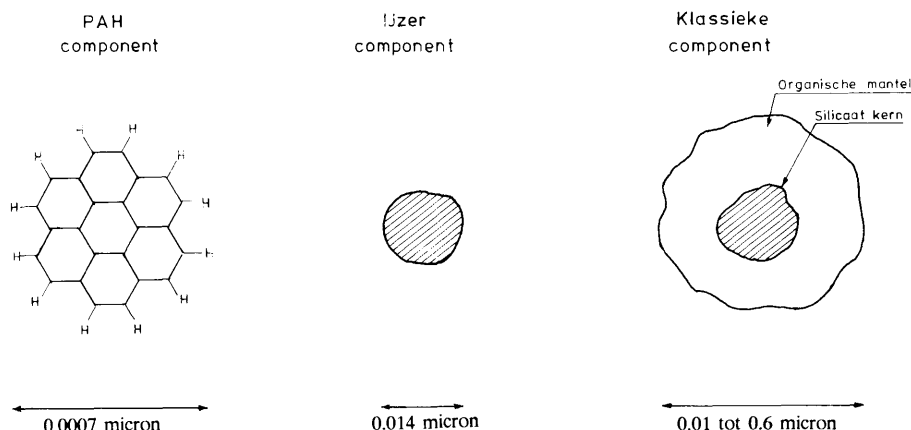
De vijfde en laatste
moet deze compon
deeltjes. Het is geb
pen bezit die de wa
ongeveer 0.01 micr
aanvullende argum
aanwezig; in mete
in gaswolken. Het
Bij supernova's⁵ zal
zorgen ervoor dat d

In hoofdstuk 9
na te gaan of er on
verwachten op gron
sterk is. Zo iets kan
de nabijheid van een
gevonden die kunne
licht.

Er is een poging
laten zien dat het c
omvat. De fysica, ch

⁵Tijdens een supernova worden de zware elementen

STOF TUSSEN DE STERREN



Figuur 2. Drie componenten waaruit het interstellair stof is samengesteld. De PAH component bestaat uit platte moleculen opgebouwd uit ringverbindingen van koolstof. De beide andere componenten bestaan uit ronde deeltjes. De ijzer component bestaat uit pure ijzeren deeltjes. Alleen één van de klassieke componenten is hier getekend. Deze bestaat uit een kern van silicaten (zand) en een mantel van verbindingen met koolstof-, stikstof-, zuurstof- en waterstofatomen. De deeltjes zijn niet op schaal getekend

De vijfde en laatste component veroorzaakt de straling bij 60 micron. Zoals we reeds zagen, moet deze component eigenschappen hebben die anders zijn dan de PAH's of de klassieke deeltjes. Het is gebleken dat de infrarode straling van kleine pure ijzerdeeltjes alle eigenschappen bezit die de waarnemingen kunnen verklaren. Kleine ijzeren bolletjes met een diameter van ongeveer 0.01 micron kunnen warm genoeg worden om bij 60 micron te stralen. Er is een aantal aanvullende argumenten voor het bestaan van ijzeren deeltjes. IJzer is in grote hoeveelheden aanwezig: in meteorieten, op aarde, in de Zon. We vinden echter haast geen vrije ijzeratomen in gaswolken. Het ijzer moet daarom op de één of andere manier in stof gecondenseerd zijn. Bij supernova's⁵ zal het ijzer als eerste condenseren en botsingen tussen kosmische stofdeeltjes zorgen ervoor dat de lichtere elementen verdampen zodat we zuivere metaaldeeltjes overhouden.

In hoofdstuk 9 vergelijken we de infrarood-eigenschappen van een groot aantal wolken om na te gaan of er onderlinge verschillen bestaan tussen de wolken. Men zou verschillen kunnen verwachten op grond van het feit dat het licht van de sterren niet overal in onze Melkweg even sterk is. Zoiets kan bijvoorbeeld plaatsvinden wanneer er zich toevallig meer heldere sterren in de nabijheid van een wolk bevinden. Er zijn inderdaad verschillen in de infrarood eigenschappen gevonden die kunnen worden toegeschreven aan afwijkingen in de intensiteit van het sterrenlicht.

Er is een poging gedaan om een ruw beeld te geven van het kosmische stof. We hebben laten zien dat het onderzoek van kosmisch stof meerdere natuurwetenschappelijke disciplines omvat. De fysica, chemie en sterrenkunde komen samen in kosmisch stof. Zoals bij elk onder-

⁵Tijdens een supernova explodeert een ster en stuurt bijna al haar materie de ruimte in. Gedurende de explosie worden de zware elementen gevormd en na verloop van tijd zal het gas in wolken samenkomen.

OVERZICHT

zoek ontstaan er nieuwe vragen. We hebben nauwelijks gesproken over het ontstaan van de componenten. De bestaande inzichten daarover zijn uitermate speculatief. Een belangrijke vraag is hoe de theorie van de stofcomponenten verder getoetst of verfijnd kan worden. Wat is de samenhang tussen de verschillende componenten: zijn ze onafhankelijk van elkaar of kan de ene component niet zonder de andere? De PAH's in onze theorie zijn uiterst simpel, en op verscheidene plaatsen in de wereld zijn chemici samen met astronomen bezig de infrarood-eigenschappen van meer complexe moleculen en ook clusters van moleculen te onderzoeken. De mogelijke gevolgen⁶ van de aanwezigheid van puur ijzer in de ruimte kunnen de basis vormen voor verder onderzoek. Bovendien is een juiste interpretatie van de waarnemingen in het infrarood belangrijk voor het begrijpen van de vorming van sterren, die diep in de wolken geboren worden.

En ergens in de ruimte begon één van de wolken zich samen te trekken om een ster te vormen. Uit een gedeelte van het gas en stof in de wolk onstond onze Zon. Uit een veel kleiner gedeelte konden de stofdeeltjes samenklonteren totdat uiteindelijk ons planetenstelsel werd gevormd. Uit dat stof is de Aarde voortgekomen: het ijzer, het zand en bovenal de koolstof.

⁶Zie hoofdstuk 7, sectie 5

Summary.
range betw
Astronomi
60 and 100
Before
observatio
historical l
optical (0.
infrared (1
surprising,
most plaus
features a
completen
this chapt

1. Interste

Dust astro
of the exi
observatio
Trum